

# ผลกระทบของอัตราความเครียดต่อการวัดสมบัติทางกลของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต

## The effect of strain rate on the determination of mechanical properties of steel bar for reinforced concrete

วีระชัย ลามอ<sup>1\*</sup>  
Werachai Lamo<sup>1\*</sup>

### บทคัดย่อ

ในการทดสอบแรงดึง มาตรฐานการทดสอบส่วนมากระบุอัตราความเครียดที่ควรปฏิบัติ เนื่องจากวัสดุจะเกิดการครากที่ระดับความแข็งแรงที่แตกต่างและมีความไวค่อนข้างต่ำต่ออัตราความเครียดสำหรับความต้านแรงดึง วัสดุที่ทดสอบตรงตามมาตรฐานการทดสอบควรให้ค่าความแข็งแรงที่เท่ากันโดยไม่คำนึงว่าห้องปฏิบัติการทดสอบใดทำการทดสอบ ความแข็งแรงของวัสดุที่แสดงอาจขึ้นอยู่กับอัตราความเครียดที่ใช้ จึงมีคำถามเกี่ยวกับผลของอัตราความเครียดว่าความแตกต่างของอัตราความเครียดมีอิทธิพลต่อสมบัติทางกลของวัสดุที่ทำการทดสอบหรือไม่

ตามมาตรฐานการทดสอบเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต ค่าสมบัติทางกลต่ำสุดที่แน่นอน เช่น ความเค้นคราก ความต้านแรงดึง ความยืดการลดทอนพื้นที่ และมอดุลัสยืดหยุ่น เป็นที่ต้องการทราบ ดังนั้น ห้องปฏิบัติการทดสอบต้องดำเนินการเพื่อให้ได้มาข้อมูลสมบัติทางกลที่น่าเชื่อถือ ความน่าเชื่อถือสูงสุดของข้อมูลสมบัติทางกล นำสู่ความถูกต้องแม่นยำในการใช้งาน ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงความเสียหายที่รุนแรง การทำให้เกิดการเสียชีวิต หรือค่าใช้จ่ายที่สูงในการซ่อมบำรุง

การวิจัยนี้ต้องการศึกษาผลกระทบของอัตราความเครียดที่แตกต่าง ( $0.000185 \text{ s}^{-1}$ ,  $0.000555 \text{ s}^{-1}$ ,  $0.001296 \text{ s}^{-1}$ ,  $0.002222 \text{ s}^{-1}$ ,  $0.011111 \text{ s}^{-1}$ , และ  $0.02963 \text{ s}^{-1}$ ) ต่อค่าสมบัติทางกล (ความเค้นคราก ความต้านแรงดึง ความยืด และการลดทอนพื้นที่) โดยพิจารณาจากความไวต่ออัตราความเครียด ( $m = \Delta x / \Delta \epsilon$ ) ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าอัตราความเครียดที่แตกต่างมีผลกระทบต่อค่าสมบัติทางกล ความต้านแรงดึงมีแนวโน้มลดลง (ประมาณ 13 MPa) และความเค้นครากมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ประมาณ 19 MPa) เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับความไวต่ออัตราความเครียดสำหรับความต้านแรงดึง  $m = -0.0024$  และความไวต่ออัตราความเครียดสำหรับความเค้นคราก  $m = 0.0045$  การเพิ่มขึ้นของอัตราความเครียดมีผลต่อความเค้นครากมากกว่าความต้านแรงดึง นอกจากนี้ ความเค้นคราก (ประมาณ  $\pm 30 \text{ MPa}$  และ  $\pm 47 \text{ MPa}$  ตามลำดับ) และความต้านแรงดึง (ประมาณ  $\pm 60 \text{ MPa}$  และ  $\pm 82 \text{ MPa}$  ตามลำดับ) มีค่าความไม่แน่นอนสูงกว่าที่อัตราความเครียดต่ำสุดและอัตราความเครียดสูงสุด นอกจากนี้ ความยืดมีแนวโน้มลดลง (ประมาณ 3%) และการลดทอนพื้นที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (ประมาณ 1%) เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับความไวต่ออัตราความเครียดสำหรับความยืด  $m = -0.0341$  และความไวต่ออัตราความเครียดสำหรับการลดทอนพื้นที่  $m = 0.0032$  เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มสูงขึ้น ความยืดลดลงอย่างมาก แตกต่างกับการลดทอนพื้นที่ที่เพิ่มขึ้นในปริมาณน้อยมากหรือแทบไม่เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ ความยืด (ประมาณ  $\pm 0.2\%$ ) และการลดทอนพื้นที่ (ประมาณ  $\pm 0.3\%$ ) มีค่าความไม่แน่นอนเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มสูงขึ้น

### Abstract

In tensile test, most of testing standards specify applicable strain rates because of that the materials will yield at different strength levels and are slightly sensitive to the strain rates for the tensile strength. The materials tested in according to the testing standards should present equivalent strength values without considering which test laboratory performs the tensile test. The presented material strength may depend upon the used strain rates. Therefore, the question comes up whether or not different strain rates have an effect on the mechanical properties of the tested materials.

**คำสำคัญ :** อัตราความเครียด ความไวต่ออัตราความเครียด สมบัติทางกล

**Keywords :** Strain rate, Strain rate sensitivity, Mechanical property

<sup>1</sup> กรมวิทยาศาสตร์บริการ กองวัสดุวิศวกรรม

\*Corresponding author e-mail address: werachai@dss.go.th

Referring to the testing standard of steel bar for reinforced concrete, it is required to know definite minimum values of the mechanical properties of steel bar for reinforced concrete, such as yield strength, tensile strength, elongation, reduction of area, and elastic modulus. Therefore, testing laboratories have to test for gaining reliable mechanical property information, which will lead to the exact utilization. This can avoid severe damage, loss of life, and high expense in maintenance.

This research study aimed to study the effect of different strain rates ( $0.000185 \text{ s}^{-1}$ ,  $0.000555 \text{ s}^{-1}$ ,  $0.001296 \text{ s}^{-1}$ ,  $0.002222 \text{ s}^{-1}$ ,  $0.011111 \text{ s}^{-1}$ , and  $0.02963 \text{ s}^{-1}$ ) on the mechanical property values (such as yield strength, tensile strength, elongation, and reduction of area) of steel bar for reinforced concrete by considering the strain rate sensitivity ( $m = \Delta x / \Delta \epsilon$ ). The experimental results showed that different strain rates had an impact on the mechanical property values. When the strain rate was increased, the tensile strength tended to decrease (around 13 MPa) and the yield strength tended to increase (around 19 MPa), according to the strain rate sensitivity for the tensile strength  $m = -0.0024$  and the strain rate sensitivity for the yield strength  $m = 0.0045$ , respectively. The increasing of the strain rate had more effect on the yield strength than the tensile strength. In addition, the uncertainties of the yield strength (about  $\pm 30 \text{ MPa}$  และ  $\pm 47 \text{ MPa}$ , respectively) and tensile strength (about  $\pm 60 \text{ MPa}$  และ  $\pm 82 \text{ MPa}$ , respectively) were higher at the minimum strain rate and the maximum strain rate. Moreover, when the strain rate was increased, the elongation tended to decrease (approximately 3%) and the reduction of area tended to slightly increase (approximately 1%), according to the strain rate sensitivity for the elongation  $m = -0.0341$  and the strain rate sensitivity for the reduction of area  $m = -0.0032$ , respectively. When the strain rate was increased, the elongation significantly decreased. In contrast, the reduction of area slightly increased or barely changed. In addition, the uncertainties of the elongation (approximately  $\pm 0.2\%$ ) and reduction of area (approximately  $\pm 0.3\%$ ) were risen very slightly, when the strain rate was increased.

## 1. บทนำ (Introduction)

ความแข็งแรงของวัสดุโลหะภายใต้แรงกระทำเป็นลักษณะสำคัญที่ต้องทราบ ในอุตสาหกรรมรถยนต์โลหะความแข็งแรงสูงถูกใช้อย่างกว้างขวางเพื่อลดน้ำหนักรถยนต์และเพิ่มความปลอดภัยแก่ผู้โดยสาร จากการศึกษาพบว่า การเสียรูปของโลหะความแข็งแรงสูงได้รับผลกระทบจากอัตราความเครียดระหว่าง  $0.001 \text{ s}^{-1}$  ถึง  $100 \text{ s}^{-1}$  และเมื่อการเสียรูปถูกเร่งเร็วขึ้น อัตราความเครียดมีบทบาทสำคัญเพิ่มมากขึ้น [1] นอกจากนี้ อัตราความเครียดระหว่าง  $0.0005 \text{ s}^{-1}$  ถึง  $0.1 \text{ s}^{-1}$  มีอิทธิพลต่อสมบัติแรงดึงของสแตนเลส ความเค้นครากเพิ่มเมื่ออัตราความเครียดสูงขึ้น แต่ทว่าความต้านแรงดึงและความยืดหยุ่นลดลงและเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในลำดับต่อมา [2] จากที่ได้กล่าว อัตราความเครียดมีผลกระทบต่อสมบัติทางกลที่ได้ การศึกษาพฤติกรรมและความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดภายใต้อัตราความเครียดที่แตกต่างจึงมีความน่าสนใจอย่างยิ่ง

มีการศึกษาจำนวนมากในพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของแผ่นเหล็ก DP780 ที่อัตราความเครียดต่างๆ จากการทดสอบแรงดึงพบว่าความยืดของแผ่นเหล็กความหนา 1.0 mm ลดลงที่อัตราความเครียดระหว่าง  $0.001 \text{ s}^{-1}$  ถึง  $0.01 \text{ s}^{-1}$  และต่อมาเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้นถึง  $100 \text{ s}^{-1}$  ความต้านแรงดึงเพิ่มเล็กน้อยที่อัตราความเครียดระหว่าง  $0.001 \text{ s}^{-1}$  ถึง  $0.1 \text{ s}^{-1}$  และต่อมาเพิ่มสูงเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้นถึง  $100 \text{ s}^{-1}$  นอกจากนี้ ความเครียดเสียหายแท้จริงของแผ่นเหล็กความหนา 1.4 mm ลดลงที่อัตราความเครียดถึง  $1 \text{ s}^{-1}$  ต่อมาเพิ่มขึ้นที่อัตราความเครียดถึง  $10 \text{ s}^{-1}$

และลดลงอีกครั้งที่อัตราความเครียดถึง  $200 \text{ s}^{-1}$  ความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้นที่อัตราความเครียดระหว่าง  $0.1 \text{ s}^{-1}$  ถึง  $100 \text{ s}^{-1}$  ยิ่งกว่านั้น ความเครียดเสียหายและความต้านแรงดึงของแผ่นความหนา 1.56 mm ลดลงที่อัตราความเครียดระหว่าง  $0.001 \text{ s}^{-1}$  ถึง  $0.1 \text{ s}^{-1}$  และต่อมาเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มสูงถึง  $1,500 \text{ s}^{-1}$  ความเข้าใจในบทบาทของอัตราความเครียดต่อพฤติกรรมความเค้น-ความเครียด อาจเป็นตัวช่วยสำคัญในการทำนายประสิทธิภาพของแผ่นเหล็กในการใช้งาน [3]

ความไวต่ออัตราความเครียด ( $m = \Delta x / \Delta \epsilon$ ) เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่สำคัญ สามารถใช้อธิบายการวัดความเค้นไหลของกระบวนการเสียรูป ความไวต่ออัตราความเครียดขึ้นอยู่กับอัตราความเครียด [4] การปฏิบัติการศึกษาทดสอบแรงดึงที่อัตราความเครียดกึ่งคงที่ (น้อยกว่า  $0.01 \text{ s}^{-1}$ ) และพลวัต ( $600, 1, 100$  และ  $1,500 \text{ s}^{-1}$ ) แสดงให้เห็นความไวต่ออัตราความเครียดเป็นลบที่อัตราความเครียดกึ่งคงที่ และความไวต่ออัตราความเครียดเป็นบวกเล็กน้อยที่อัตราความเครียดพลวัต เนื่องจากกลไกความเสียหายที่แตกต่างเกิดขึ้น ดังนั้น ข้อมูลของความไวต่ออัตราความเครียดที่แตกต่าง อาจให้ข้อมูลที่สำคัญในการอธิบายกลไกการเสียรูป [5]

เหล็กเสริมคอนกรีตเป็นวัสดุโลหะหนึ่งที่สำคัญที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานก่อสร้าง ซึ่งถูกใช้ในการรับแรงดึงเป็นหลัก ตามมาตรฐานในปัจจุบันที่เกี่ยวข้อง ค่าสมบัติทางกลต่ำสุดที่แน่นอน เช่น ความเค้นคราก ความต้านแรงดึง ความยืด และมอดูลัสยืดหยุ่น เป็นที่ต้องการทราบ การผันแปรของสมบัติทางกลต่างๆ เนื่องจาก

อัตราความเครียด เป็นสิ่งที่ห้องปฏิบัติการต่าง ๆ ควรให้ความสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อการให้ได้มาของข้อมูลสมบัติทางกลที่น่าเชื่อถือ ความน่าเชื่อถือได้สูงสุดของข้อมูลสมบัติทางกลที่ได้นำไปสู่ความถูกต้องแม่นยำในการใช้งาน กล่าวอีกอย่างหนึ่ง ข้อมูลสมบัติทางกลที่น่าเชื่อถือ ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงความเสียหายที่รุนแรง การทำให้เกิดการเสียชีวิต และค่าใช้จ่ายที่สูงในการซ่อมบำรุงได้

## 2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

การวัดทางการทดลองต่อไปนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพิสูจน์ผลกระทบของการให้แรงกระทำต่อชิ้นทดสอบโดยการควบคุมอัตราความเครียดที่แตกต่าง ต่อค่าของสมบัติทางกลของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบแรงดึง

2.1 ชิ้นทดสอบเตรียมอย่างแม่นยำตามมาตรฐาน ISO 6892-1: 2009 ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.9 มม. ความยาวพิคด 45 มม. และความยาว 150 มม. นอกจากนั้น ชิ้นทดสอบทั้งหมดถูกเตรียมเหมือน ๆ กันจากเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต

2.2 การทดสอบแรงดึง ดำเนินการทดสอบแรงดึงโดยใช้เครื่องทดสอบ Universal testing machine : SHIMADZU รุ่น UHF500kNI ที่อุณหภูมิห้อง โดยอ้างอิงมาตรฐานการทดสอบแรงดึงที่ได้รับการยอมรับ ISO 6892-1 : 2009 เพื่อลดความผันแปรของข้อมูลที่จะได้ ในแต่ละเงื่อนไขการทดสอบ ทำการทดสอบจำนวน 3 ชิ้น

2.3 ในการทดสอบแรงดึง ทำการควบคุมอัตราความเครียดที่แตกต่าง  $0.000185 \text{ s}^{-1}$ ,  $0.000555 \text{ s}^{-1}$ ,  $0.001296 \text{ s}^{-1}$ ,  $0.002222 \text{ s}^{-1}$ ,  $0.011111 \text{ s}^{-1}$ , และ  $0.02963 \text{ s}^{-1}$  โดยกำหนดความเร็วของเครื่อง

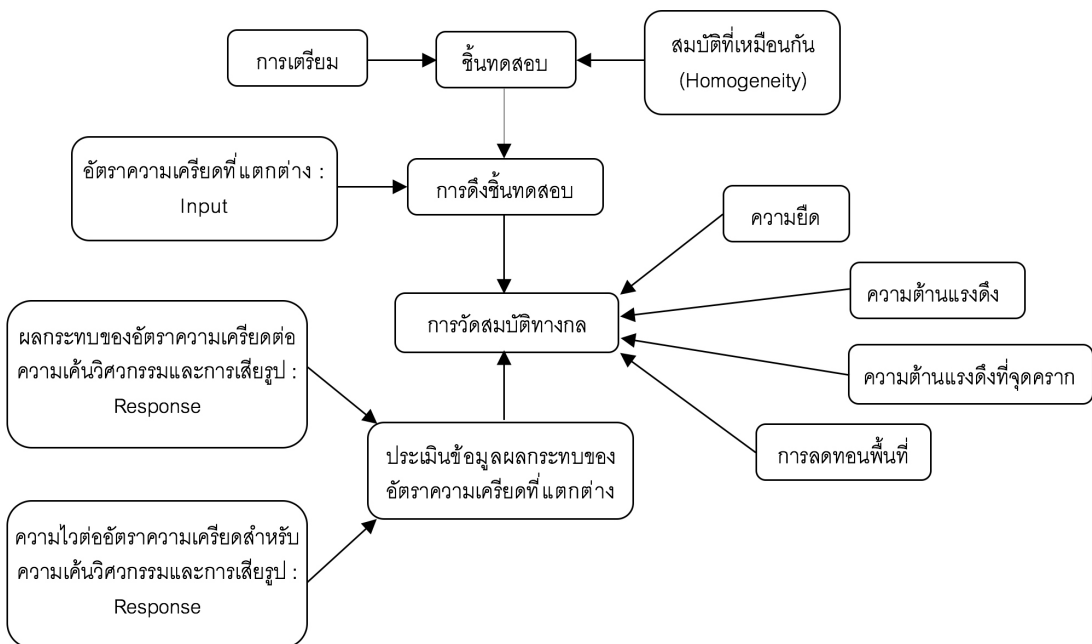
ทดสอบให้เท่ากับอัตราความเครียดด้วยการใช้อัตราการแยกห่างจากกันของหัวจับ  $v_c = L_c \dot{\epsilon}_c$  เมื่อ  $\dot{\epsilon}_c$  คือ อัตราความเครียดโดยประมาณของความยาวส่วนขนาน และ  $L_c$  คือ ความยาวส่วนขนาน

## 3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

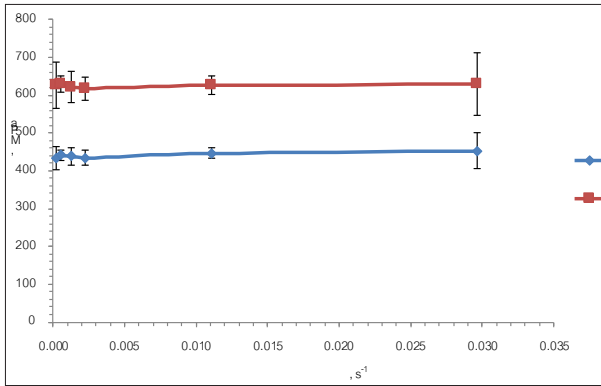
อัตราความเครียดเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ต้องพิจารณาเมื่อทำการทดสอบสมบัติทางกลของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตจากการทดสอบแรงดึง อัตราความเครียดที่ระดับต่าง ๆ มีผลต่อพฤติกรรมของความเค้น-ความเครียด และการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกล

### 3.1 ความแข็งแรงสำหรับเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต

ความต้านแรงดึงและความเค้นครากมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเพิ่มอัตราความเครียด (รูปที่ 2) ความต้านแรงดึง (จากประมาณ 629 MPa ถึง 616 MPa) มีแนวโน้มลดลง และความเค้นคราก (จากประมาณ 433 MPa ถึง 452 MPa) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้นจาก  $0.000185 \text{ s}^{-1}$  ถึง  $0.02963 \text{ s}^{-1}$  พบว่าการเพิ่มอัตราความเครียดมีผลต่อการเพิ่มความเค้นคราก ประมาณ 19 MPa มากกว่าการลดของความต้านแรงดึง ประมาณ 13 MPa สอดคล้องกับความไวต่ออัตราความเครียดสำหรับความเค้นคราก  $m=0.0045$  และความไวต่ออัตราความเครียดสำหรับความต้านแรงดึง  $m=-0.0024$  (รูปที่ 3) นอกจากนั้น พบว่าเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้นไม่มากในช่วงต่ำ  $0.000185 \text{ s}^{-1}$  ถึง  $0.00222 \text{ s}^{-1}$  ความเค้นครากเพิ่มขึ้นไม่มากเช่นเดียวกัน จากประมาณ 433 MPa ถึง 441 MPa แต่ทว่า ต่อมาเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มสูงขึ้นมากในช่วงสูง  $0.00222 \text{ s}^{-1}$  ถึง  $0.02963 \text{ s}^{-1}$  ความเค้นครากเพิ่มขึ้นมากเช่นเดียวกัน จากประมาณ



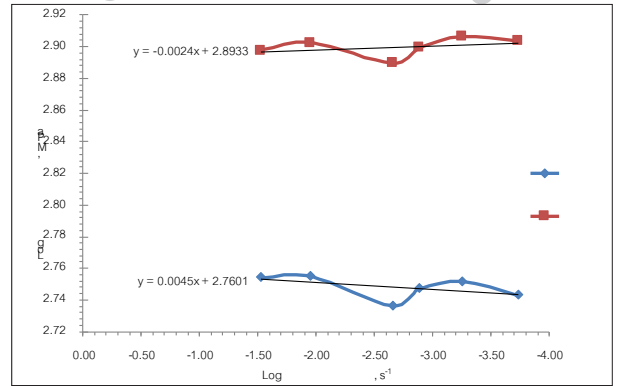
รูปที่ 1 กระบวนการทดลองสำหรับการวัดผลกระทบของอัตราความเครียดต่อค่าสมบัติทางกล



รูปที่ 2 ผลกระทบของอัตราความเครียดต่อความเค้นวิศวกรรม

441 MPa ถึง 453 MPa ในความแตกต่าง ความต้านแรงดึงมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้นจากช่วงต่ำสู่ช่วงสูง ยิ่งกว่านั้น เมื่อพิจารณาความไม่แน่นอนพบว่าที่อัตราความเครียดต่ำสุด  $0.000185 \text{ s}^{-1}$  และอัตราความเครียดสูงสุด  $0.02963 \text{ s}^{-1}$  ความไม่แน่นอนของความเค้นครากเกิดขึ้นสูง (ประมาณ  $\pm 30 \text{ MPa}$  และ  $\pm 47 \text{ MPa}$  ตามลำดับ) และความไม่แน่นอนของความต้านแรงดึงเกิดขึ้นสูง (ประมาณ  $\pm 60 \text{ MPa}$  และ  $\pm 82 \text{ MPa}$  ตามลำดับ)

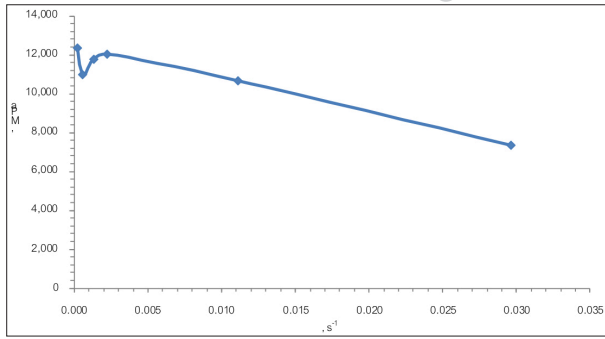
จุดครากกำหนดเป็นจุดที่ปริมาณการเสียรูปแบบถาวรเกิดขึ้น จุดครากมีความสำคัญอย่างมากสำหรับการกำหนดความแข็งแรงของโลหะ เนื่องจากจุดครากแสดงขีดจำกัดบนสู่การเสียรูปแบบถาวร หรือคือความเครียดสูงสุดที่โลหะสามารถรับได้โดยปราศจากการเสียรูปแบบถาวร ความแข็งแรงของโลหะจะค่อย ๆ ลดลงในตอนแรก เนื่องจากการเพิ่มมากขึ้นของจุดบกพร่อง ต่อมาเมื่อการเสียรูปเข้าสู่ขอบเขตถาวร การเสียรูปแบบถาวรทำให้การเรียงตัวของโครงสร้างเปลี่ยนแปลงอย่างถาวร โลหะจะค่อย ๆ ไหลผ่านโครงข่ายผลึกโดยการเคลื่อนตัวของอะตอม การรวมตัวของจุดบกพร่องเล็ก ๆ เช่น รอยแตกเล็ก ๆ การเคลื่อนตัวของอะตอม รู และแยกตัวของพันธะ ระหว่างการเสียรูปแบบถาวรจะค่อย ๆ ลดความแข็งแรงของโลหะ ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของความเค้นครากเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น สามารถสันนิษฐานได้ว่า ที่อัตราความเครียดต่ำโครงสร้างไหลผ่านโครงข่ายผลึกโดยการเคลื่อนตัวของอะตอม มีเวลาเพียงพอสำหรับโครงข่ายผลึกจะสามารถเรียงตัวอย่างกันได้อย่างสม่ำเสมอ ในความแตกต่างที่อัตราความเครียดสูง โครงสร้างไหลผ่านโครงข่ายผลึกโดยการเคลื่อนตัวของอะตอมในความเร็วที่สูงขึ้น ทำให้เกิดการเรียงตัวของโครงข่ายผลึกที่ไม่สม่ำเสมอ การเคลื่อนตัวของอะตอมเกิดการซ้อนตัวที่สูงขึ้นบริเวณขอบเกรน ทำให้เกิดการต้านทานของเกรนที่สูงขึ้นหรือมีอุปสรรคมากขึ้น เป็นสาเหตุให้ต้องใช้แรงที่มากขึ้นในการทำให้อะตอมเคลื่อนที่ผ่านอุปสรรค หรือต้องใช้แรงที่มากขึ้น สอดคล้องกับความเค้นครากที่สูงขึ้นเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับ [2] การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลจากอัตราความเครียดอธิบายได้จากประเด็นการเคลื่อนตัวของอนุภาค เป็น



รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงของ Log ความเค้นแท้จริงเนื่องจากการเพิ่ม Log อัตราความเครียด

ที่รู้กันดีว่าโลหะมีความสามารถการแข็งแรงที่สูงเนื่องจากความหนาแน่นการเคลื่อนตัวของอนุภาค การเลื่อนของการเคลื่อนตัวควบคุมการเพิ่มขึ้นของความเค้นไหลระหว่างการเสียรูปจากการดึงเริ่มต้น เพื่อที่จะรักษาอัตราความเครียดที่ให้ที่สูงขึ้น ความเร็วการเคลื่อนตัวของอนุภาคเฉลี่ยจึงต้องการความเค้นไหลที่เพิ่มขึ้นในเวลาเดียวกัน ดังนั้น ความเค้นครากจึงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มสูงขึ้น

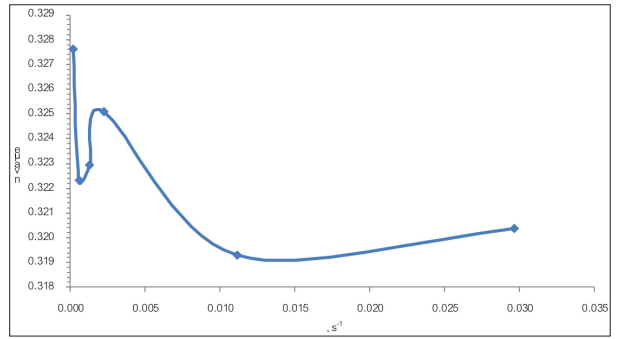
นอกจากนั้น เมื่อเลยจุดครากหรือการเสียรูปเข้าสู่ขอบเขตถาวรมากขึ้น การเสียรูปแบบถาวรทำให้การเรียงตัวของโครงสร้างเปลี่ยนแปลงอย่างถาวร โลหะจะค่อย ๆ ไหลผ่านโครงข่ายผลึกโดยการเคลื่อนตัวของอะตอม การรวมตัวของจุดบกพร่องเล็ก ๆ เช่น รอยแตกเล็ก ๆ การเคลื่อนตัวของอะตอม รู และแยกตัวของพันธะ ระหว่างการเสียรูปแบบถาวรจะค่อย ๆ ลดความแข็งแรงของโลหะ โลหะจะสูญเสียความสามารถต้านทานต่อความเค้นที่กระทำ นอกจากนั้น การแตกกว้างขึ้นอยู่กับความแข็งแรงการยึดเกาะของโมเลกุล และแรงยึดตัวของรอยแตกของโลหะ การแตกกว้างจะเกิดขึ้นเมื่อความเค้นสูงสุดเพิ่มสูงขึ้นถึงค่าวิกฤติ ดังนั้น การลดลงของความต้านแรงดึงเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น สามารถสันนิษฐานได้ว่า ที่อัตราความเครียดสูง การแตกกว้างและการแยกตัวของระหว่างผิวหน้าของอะตอมหรืออนุภาค และการแตกของอนุภาคทำให้เกิดช่องว่างและรอยแตก ความไม่ต่อเนื่องในรูปของช่องว่างและรอยแตกที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า เกิดขึ้นสูง สอดคล้องการลดลงของมอดูลัสยืดหยุ่นที่ลดลงมากขึ้นเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น เห็นได้จากรูปที่ 4 นอกจากนั้น การเสียรูปแบบถาวรเพิ่มสูงขึ้น การเคลื่อนตัวของขอบเกรนจะผ่านอุปสรรคที่สูงขึ้นจากการซ้อนตัวของอะตอม รู้จักกันในชื่อความเครียดแข็งตัว (Strain hardening,  $\eta$ ) ค่า  $\eta$  ควบคุมปริมาณความเครียดถาวรแบบสม่ำเสมอซึ่งวัสดุประสบก่อนการอ่อนตัวลงแบบเฉพาะที่ (Strain Localization) การเกิดคอขวด และการแตกหัก [6] ดัชนีความเครียดแข็งตัวที่สูงกว่าแสดงว่ามีความเครียดแข็งตัวที่มากกว่า ดัชนีความเครียดแข็งตัวเกี่ยวข้องกับการรวมตัวในวัสดุที่แข็งตัวแบบเส้นตรง ผลกระทบ



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงของมอดูลัสยืดหยุ่นเนื่องจากการเพิ่มอัตราความเครียด

ของความเครียดแข็งตัวต่อการรวมตัวเกี่ยวข้องกับความแตกต่างของความแข็งแรงระหว่างบริเวณที่เสียรูปซึ่งกำลังแข็งขึ้นจากการเสียรูปแบบถาวร และบริเวณที่ไม่เสียรูปซึ่งกำลังจำกัดวงของการเสียรูปแบบถาวร เห็นได้จากรูปที่ 5 มีค่าลดลงที่อัตราความเครียดสูงหรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง ที่อัตราความเครียดสูง เกรนจะถูกทำลายมากขึ้น ทำให้การเคลื่อนตัวของขอบเกรนผ่านอุปสรรคที่น้อยลง เหตุผลดังกล่าวสอดคล้องกับการลดลงของความต้านแรงดึงเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น

ยิ่งกว่านั้น การกำเนิดของจุดบกพร่องถูกเร่งให้เกิดระหว่างการเสียรูปโดยการปรากฏขึ้นของโครงสร้างย่อยการเคลื่อนที่ (Dislocation) และการเติบโตของอนุภาคมีการขยายใหญ่เร็วขึ้นกว่าในสภาพอยู่หนึ่ง เนื่องจากสัมประสิทธิ์การกระจายที่เพิ่มโดยกลไกการกระจายของแกนกลางในการปรากฏขึ้นของความพิพพันการเคลื่อนที่ อย่างไรก็ตาม การเสียรูปที่เกิดขึ้นอาจลดจำนวนนิวเคลียสและอนุภาคยึดเกาะ เนื่องจากการตัดผ่านจากการเคลื่อนที่มีจำนวนมากและการละลายของนิวเคลียสขนาดวิกฤตย่อย อนุภาคที่ใหญ่ที่กำเนิดในขั้นทดสอบอาจขยายใหญ่เร็วขึ้น เนื่องจากผลของการอิมพัลส์ที่มากเกินไปของเมทริกซ์ กลไกดังกล่าวข้างต้นของการขยายใหญ่ของอนุภาคที่ถูกชักนำจากความเครียดอาจทำงานเป็นพิเศษระหว่างการเสียรูปแบบไม่สม่ำเสมอ ระหว่างปริมาณวัสดุที่ถูกแบ่งเป็นพื้นที่ที่ทำงานและพื้นที่ที่ไม่ทำงาน สลับสับเปลี่ยนกันระหว่างการเสียรูป [4] ดังนั้น สันนิษฐานได้ว่า การลดลงของความต้านแรงดึงที่อัตราความเครียดสูงได้รับอิทธิพลจากการบวมการดัดงอที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อวัสดุถูกให้ความเครียด โดยทั่วไป พลังงานกลที่นำสู่ขั้นทดสอบโดยการเสียรูปแบบถาวรเกือบ 90% ถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ส่วนที่เหลือของพลังงานกลถูกเก็บในรูปแบบของพลังงานยืดหยุ่นของการเคลื่อนที่ [2] นอกจากนี้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นยังได้รับผลจากความร้อนที่เปลี่ยนรูปและการกระจายความร้อนโดยการนำความร้อน ในกรณีที่อัตราความเครียดต่ำ เวลาของการนำความร้อนยาวนานและการกระจายความร้อนเข้าใกล้การกำเนิดความร้อนโดยไม่มีความร้อนถ่ายเทเข้า-ออกจากระบบ และไม่มี การเปลี่ยนรูปมาร์เทนไซต์ ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในขั้น



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของ n value เนื่องจากการเพิ่มอัตราความเครียด

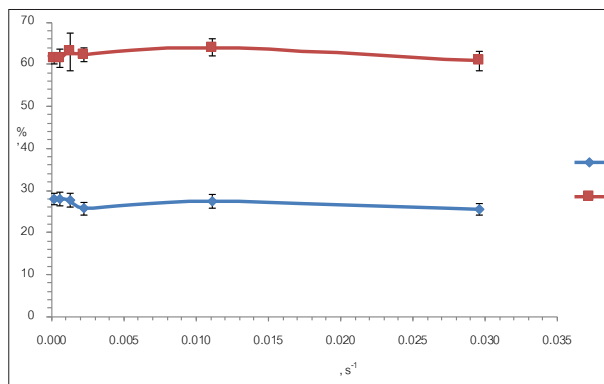
ทดสอบไม่สูงขึ้นมาก ในทางตรงกันข้าม การกำเนิดความร้อนสูงชันมากกว่าการกระจายความร้อนที่อัตราความเครียดสูง ส่งผลให้อุณหภูมิขั้นทดสอบเพิ่มสูงขึ้นสูงชัดเจน ด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้น ขนาดของเกรนจะขยายขึ้นจากกลไก Hall-Petch และขนาดของเกรนจะใหญ่ขึ้น ด้วยเกรนที่เปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีอิทธิพลต่อการลดลงของความเค้น นอกจากนั้น พบว่าความหนาแน่นของแถบเลื่อนตัวจุดตัดของแถบเพิ่ม และมาร์เทนไซต์สูงชัน เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น [7] จากเหตุผลที่กล่าวมาสนับสนุนพฤติกรรมลดลงของความต้านแรงดึงเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนั้น คำอธิบายการลดลงความต้านแรงดึงเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มสูงขึ้นอาจอ้างถึงแนวคิดกลไกความเสียหาย ปฏิกิริยาการร่อนของความไวต่ออัตราความเครียดสามารถอธิบายโดยการรวมทฤษฎี Griffith และแนวคิดการขยายใหญ่ของรอยแตกวิกฤตย่อยตามทฤษฎี Griffith ความเสียหายในวัสดุเปราะเกิดขึ้นเมื่อตำหนิมีขนาดเกินขนาดวิกฤตความเค้นที่ให้ ถ้าให้ภาวะที่อัตราความเครียดต่ำ ขนาดตำหนิวิกฤตย่อยมีเวลาขยายใหญ่ ดังนั้น ความเสียหายเกิดขึ้นที่ค่าภาระต่ำ อย่างไรก็ตาม ถ้าให้ภาวะที่อัตราความเครียดสูง มีเวลาเล็กน้อยหรือไม่มีความมากพอสำหรับการขยายใหญ่ของตำหนิวิกฤตย่อย วัสดุสามารถไปถึงภาวะที่สูงกว่าก่อนความเสียหายเกิดขึ้น

### 3.2 การเสียรูปสำหรับเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต

ความยืดและการลดทอนพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเพิ่มอัตราความเครียด (รูปที่ 6) ความยืด (จากประมาณ 28% ถึง 25%) มีแนวโน้มลดลง และการลดทอนพื้นที่ (จากประมาณ 61% ถึง 62%) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้นจาก  $0.000185 \text{ s}^{-1}$  ถึง  $0.02963 \text{ s}^{-1}$  พบว่า การเพิ่มอัตราความเครียดมีผลต่อการลดลงของความยืดประมาณ 3% และเพิ่มขึ้นของการลดทอนพื้นที่ประมาณ 1% สอดคล้องกับความไวต่ออัตราความเครียดสำหรับความยืด  $m = -0.0341$  และความไวต่ออัตราความเครียดสำหรับการลดทอนพื้นที่  $m = 0.0032$  (รูปที่ 7) นอกจากนั้น พบว่าเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้นไม่มากในช่วงต่ำ  $0.000185 \text{ s}^{-1}$  ถึง  $0.00222 \text{ s}^{-1}$  ความยืดลดลงไม่มาก จากประมาณ 28% ถึง 27% แต่พบว่า ต่อมาเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มสูงขึ้นมากในช่วงสูง  $0.00222 \text{ s}^{-1}$

ถึง  $0.02963 \text{ s}^{-1}$  ความยืดลดลงมากขึ้น จากประมาณ 27% ถึง 25% สอดคล้องกับ [5] ความไวต่ออัตราความเครียดที่เป็นลบ ส่งให้เกิดสภาพที่เหมาะสมสำหรับการอ่อนตัวลงแบบเฉพาะที่ ลดปริมาณความเครียดที่ต้องการสำหรับการขยายใหญ่ของช่องว่าง การลดลงของความยืดจากอัตราความเครียดที่เพิ่มขึ้นอาจเป็นไปได้เพราะความเครียดที่ต่ำกว่าเป็นที่ต้องการสำหรับการขยายใหญ่ภายในบริเวณแถบเฉือน ในส่วนของการลดทอนพื้นที่ เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้นในช่วงต่ำและช่วงสูง การลดทอนพื้นที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในปริมาณน้อยมาก ๆ หรือแทบไม่เปลี่ยนแปลง ยิ่งกว่านั้น เมื่อพิจารณาความไม่แน่นอน พบว่าที่อัตราความเครียดเพิ่มสูงขึ้น ความไม่แน่นอนของความยืดและการลดทอนพื้นที่เพิ่มสูงขึ้น เล็กน้อย (ประมาณ  $\pm 0.2\%$  และ  $\pm 0.3\%$  ตามลำดับ)

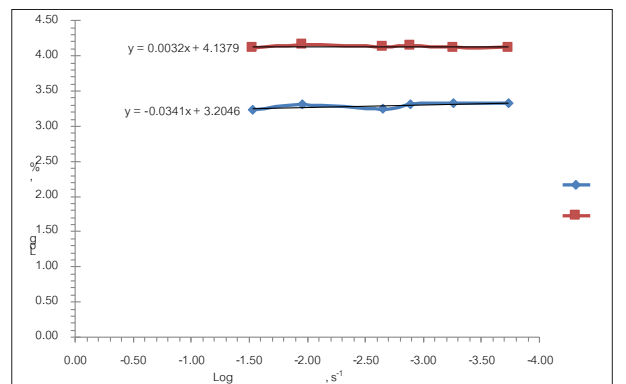
โดยทั่วไป ความเหนียวมีความเกี่ยวข้องกับการเกิดขึ้น การขยายใหญ่ และการรวมตัวของช่องว่าง และการแตกหักของวัสดุ [8] เมื่อวัสดุถูกกระทำให้เสียรูปอย่างต่อเนื่อง การหลุดออกจากกันและการแตกหักของโครงสร้างจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ส่งผลต่อการเกิดขึ้นของการขยายใหญ่ของช่องว่าง ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของความเครียดส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณช่องว่าง ปริมาณช่องว่างที่เพิ่มขึ้นระหว่างการเสียรูปอย่างต่อเนื่องมีผลต่อการลดลงของความเหนียว นอกจากนี้ ความเหนียวมีความเกี่ยวข้องกับความเครียดต่าง ๆ ทั้งภายนอก เช่น โพรง และการรวมของอนุภาคประกอบ และภายใน เช่น การขาดแคลนของการแข็งตัว และความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ที่กล่าวมาเป็นปัจจัยที่ทำให้ความเหนียวของวัสดุลดลง ดังนั้น ความเหนียวมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง [9] นอกจากนี้ ระหว่างการเสียรูปจากแรงดึง ขนาดรอยนูนบนผิวหน้าที่เกิดเปลี่ยนแปลงอย่างมากขึ้นอยู่กับอัตราความเครียด [2] ที่อัตราความเครียดที่สูงขึ้น ความหนาแน่นของรอยนูนจะต่ำลง ในขณะที่ขนาดของรอยนูนใหญ่ขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอัตราความเครียด โครงข่ายของรอยนูนขนาดเล็กถูกแทนที่โดยรอยนูนขนาดใหญ่ ทำให้ความหนาแน่นของรอยนูนขนาดเล็กลดลง สอดคล้องกับการลดลงของความยืด ดังนั้น การลดลงของความยืดเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้นสามารถ



รูปที่ 6 ผลกระทบของอัตราความเครียดต่อการเสียรูป

สันนิษฐานได้ทำนองเดียวกันกับการลดลงของความต้านแรงดึง เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้นที่อัตราความเครียดสูง การแตกกว้างและการแยกตัวของระหว่างผิวหน้าของอะตอมหรืออนุภาค และการแตกของอนุภาค ทำให้เกิดช่องว่างและรอยแตก ความไม่ต่อเนื่องในรูปของช่องว่าง และรอยแตกที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า จะเกิดขึ้นสูงกว่า นอกจากนั้น สามารถอธิบายเพิ่มเติมได้จากที่อัตราความเครียดสูง ขนาดของช่องว่างที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าต่าง ๆ เชื่อมต่อกันเป็นช่องว่างที่มีขนาดใหญ่ขึ้น กล่าวอีกนัยหนึ่ง ช่องว่างที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกระจัดกระจายทั่วบริเวณผิวหน้าและมีจำนวนมากในตอนแรกมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากช่องว่างดังกล่าวรวมตัวกันเป็นโครงข่าย ก่อตัวเป็นช่องว่างที่มองเห็นด้วยตาเปล่า เป็นสาเหตุเหตุทำให้ความยืดลดลงเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ [10] รายงานว่าความเหนียวมีค่าต่ำเมื่อจุดบกพร่องมีขนาดใหญ่

นอกจากนั้น ดัชนีความเครียดแข็งตัว  $n$  เกี่ยวข้องกับการรวมตัวในวัสดุที่แข็งตัวแบบเส้นตรง ผลกระทบของความเครียดแข็งตัวต่อการรวมตัวเกี่ยวข้องกับความแตกต่างของความแข็งแรงระหว่างบริเวณที่เสียรูปซึ่งกำลังแข็งขึ้นจากการเสียรูปแบบถาวร และบริเวณที่ไม่เสียรูปซึ่งกำลังจำกัดวงการเสียรูปแบบถาวร กล่าวอีกนัยหนึ่ง กลไกการอ่อนตัวลงซึ่งเป็นปรากฏการณ์แบบเฉพาะที่ (Strain localization) ขึ้นอยู่กับดัชนีความเครียดแข็ง  $n$  อย่างมาก ค่าที่น้อยของดัชนีความเครียดแข็งชี้ให้เห็นกลไกการอ่อนตัวลงซึ่งเป็นปรากฏการณ์แบบเฉพาะที่ที่สูง [11] และเกี่ยวข้องกับความเหนียวที่สูงของวัสดุ จะเห็นได้จากผลการทดลอง (รูปที่ 5) ดัชนีความเครียดแข็ง  $n$  ลดลงที่อัตราความเครียดสูง แสดงให้เห็นว่าที่อัตราความเครียดสูง เกิดกลไกการอ่อนตัวลงซึ่งเป็นปรากฏการณ์แบบเฉพาะที่ที่สูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับความยืดที่ลดลงเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น เมื่อวัสดุถูกให้ความเครียด โดยทั่วไปพลังงานกลที่นำสู่ขึ้นทดสอบโดยการเสียรูปแบบถาวรเกือบ 90% ถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ส่วนที่เหลือของพลังงานกลถูกเก็บในรูปของพลังงานยึดหยุ่นของ dislocation นอกจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ยังได้รับผลจาก



รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงของ Log การเสียรูปเนื่องจากการเพิ่ม Log อัตราความเครียด

ความร้อนจากการเปลี่ยนรูปและการกระจายความร้อนโดยการนำความร้อนในกรณีนี้ที่อัตราความเครียดต่ำ เวลาของการนำความร้อนยาวนานและการกระจายความร้อนเข้าใกล้การกำเนิดความร้อน โดยไม่มีความร้อนถ่ายเทเข้า-ออกจากระบบและไม่มีการเปลี่ยนรูปมาร์เทนไซต์ ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในขั้นตอนทดสอบไม่สูงขึ้นมาก [2] ในทางตรงกันข้าม การกำเนิดความร้อนสูงขึ้นมากกว่าการกระจายความร้อนที่อัตราความเครียดสูง ส่งผลให้อุณหภูมิของขั้นตอนทดสอบแรงดึงเพิ่มขึ้นสูงอย่างชัดเจน ด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้ ขนาดของเกรนเปลี่ยนแปลงหยาบขึ้นจากกลไกแบบ Hall-Petch และขนาดของเกรนใหญ่ขึ้น เกรนที่เปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีอิทธิพลต่อการลดลงของความเค้นและความเหนียว [12] และ [5] นอกจากนี้ มีการรายงานว่าโครงสร้างที่หยาบจะเสียหายอย่างไม่เป็นเนื้อเดียวกันหรือไม่สม่ำเสมอ และทำให้เกิดปรากฏการณ์แบบเฉพาะที่ของการไหล (Flow localization) ในแถบการเคลื่อนที่แคบซึ่งจำกัดความเหนียว [13] จากเหตุผลที่กล่าวมาสนับสนุนพฤติกรรมการลดลงของความยืด เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มสูงขึ้น

#### 4. สรุป (Conclusion)

4.1 ความต้านแรงดึงและความเค้นครากของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเพิ่มอัตราความเครียด ความต้านแรงดึงมีแนวโน้มลดลง (ความไวต่ออัตราความเครียด  $m=-0.0024$ ) และความเค้นครากมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ความไวต่ออัตราความเครียด  $m=0.0045$ ) เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้นและการเพิ่มอัตราความเครียดมีผลต่อความเค้นคราก (ประมาณ 19 MPa) มากกว่าความต้านแรงดึง (ประมาณ 13 MPa) ความเค้นครากเพิ่มขึ้นมากเมื่อมีการเพิ่มอัตราความเครียดสูงช่วงสูง ในความแตกต่าง ความต้านแรงดึงมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้นจากอัตราความเครียดต่ำสู่อัตราความเครียดสูง นอกจากนั้น ความเค้นคราก (ประมาณ  $\pm 30$  MPa และ  $\pm 47$  MPa ตามลำดับ) และความต้านแรงดึง (ประมาณ  $\pm 60$  MPa และ  $\pm 82$  MPa ตามลำดับ) มีค่าความไม่แน่นอนสูงกว่าที่อัตราความเครียดต่ำสุด  $0.000185 \text{ s}^{-1}$  และอัตราความเครียดสูงสุด  $0.02963 \text{ s}^{-1}$


4.2 ความยืดและการลดทอนพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากอัตราความเครียดที่แตกต่าง ความยืดมีแนวโน้มลดลงประมาณ 3% (ความไวต่ออัตราความเครียด  $m=-0.0341$ ) และการลดทอนพื้นที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นประมาณ 1% (ความไวต่ออัตราความเครียด  $m=0.0032$ ) เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น ความยืดลดลงไม่มากในช่วงอัตราความเครียดต่ำ แต่ความยืดลดลงมากขึ้นเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มสูงขึ้นในส่วนของ การลดทอนพื้นที่ การลดทอนพื้นที่เพิ่มขึ้นในปริมาณน้อยมากหรือแทบไม่เปลี่ยนแปลงเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้นจากช่วงต่ำสู่ช่วงสูง นอกจากนั้น ความยืด (ประมาณ  $\pm 0.2\%$ ) และการลดทอนพื้นที่ (ประมาณ  $\pm 0.3\%$ ) มีค่าความไม่แน่นอนเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มสูงขึ้น

#### 5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ขอขอบคุณกลุ่มวัสดุก่อสร้าง กองวัสดุวิศวกรรมกรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการศึกษาวิจัย

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] HUH, J., H. HUH and C. S. LEE. Effect of strain rate on plastic anisotropy of advanced high strength steel sheets. *International Journal of Plasticity*. May, 2013, **44**, 23-46.
- [2] LI, X., J. CHEN, L. YE, W. DING and P. SONG, Influence of strain rate on tensile characteristics of SUS304 metastable austenitic stainless steel. *ACTA Metallurgica Sinica*. 2013, **26**(6), 657-662.
- [3] ANDERSON, D., S. WINKLER, A. BARDELICIK and M. J. WORSWICK. Influence of triaxiality and strain rate on the failure behaviour of a dual-phase DP780 steel. *Materials & Design*. August, 2014, **60**, 198-207.
- [4] BLAZ, L. and E. EVANGELISTA. Strain rate sensitivity of hot deformed Al and AlMgSi alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 1996, **207**(2), 95-201.
- [5] HADIANFARD, M. J., R. SMERD, S. WINKLER and M. WORSWICK. Effects of strain rate on mechanical properties and failure mechanism. *Materials Science and Engineering: A*. 2008, **492**(1-2), 283-292.
- [6] LUO, J., M. Li, W. Yu and H. Li. The variation of strain rate sensitivity exponent and strain hardening exponent in isothermal compression of Ti-6Al-4V alloy. *Materials & Design*. 2010, **31**(2), 741-748.
- [7] LICHTENFELD, J. A., M. C. MATAYA and C. J. VAN TYNE. Effect of strain rate on stress-strain behavior of alloy 309 and 304L austenitic stainless steel. *Metallurgical and Materials Transactions: A*. 2006, **37**(1), 147-161.
- [8] ZHOU, F., J. N. WANG and J. S. LIAN. An investigation of the plastic failure of spheroidized steels. *Materials Science and Engineering: A*. 2002, **332**(1-2), 117-122.
- [9] FAN, G. J., L. F. FU, H. CHOO, P. K. LIAW and N. D. BROWNING. Uniaxial tensile plastic deformation and grain growth of bulk nanocrystalline alloys. *Acta Materialia*. 2006, **54**(18), 4781-4792.
- [10] NILSSON, K. F and V. VOKAL. Analysis of ductile cast iron tensile tests to relate ductility variation to casting defects and material microstructure, *Materials Science and Engineering: A*. 2009, **502**(1-2), 54-63.

- 
- [11] BACHA, A., D. DANIEL and H. KLOCKER. On the determination of true stress triaxiality in sheet metal. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007, **184**(1-3), 272-287.
- [12] PUTATUNDA, S.K. Fracture toughness of a high carbon and high silicon steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2001, **297**(1-2), 31-43.
- [13] ELWAZRI, A. M., P. WANJARA and S. YUE. The effect of microstructural characteristics of pearlite on the mechanical properties of hypereutectoid steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2005, **404**(1-2), 91-98.